

# Evaluación del potencial energético y la eficiencia para generar energía mediante la producción de metano

## Assessment of the energy potential and efficiency for energy generation through methane production

Jose Antonio Vargas Maron<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>Universidad Nacional del Altiplano, Puno, Perú.

### Resumen

Este trabajo de investigación tuvo como objetivo evaluar la relación entre la producción de metano por biodigestión de residuos sólidos orgánicos, su potencial energético y la eficiencia para generar energía eléctrica en la ciudad de Puno. Los objetivos específicos incluyeron la caracterización de los residuos orgánicos y la evaluación del potencial energético del metano. El enfoque principal fue la biodigestión anaeróbica, un proceso que descompone materia orgánica en condiciones de ausencia de oxígeno, generando metano como subproducto. Se centró en residuos de alimentos, cascaras y restos de frutas y verduras, como principales componentes de la biomasa, recolectados en los mercados de la ciudad. Se empleó un enfoque de investigación cuantitativa descriptiva para recopilar datos específicos sobre la producción de metano, potencial energético y eficiencia en la generación de energía eléctrica. En cuanto a los resultados, el rendimiento del proceso de biodigestión es 41,5709, que permite producir un volumen de 734,6382 metros cúbicos de metano. El potencial energético calculado del metano producido es de 5142,6802 Kwh. (18513,65 Mega julios), subrayando la viabilidad de aprovechar residuos orgánicos para la generación de energía. La potencia eléctrica estimada es de 303,7, que confirma la eficiencia del proceso, especialmente considerando la composición específica de la biomasa. Este estudio proporciona perspectivas valiosas para el desarrollo de estrategias sostenibles de gestión de residuos y generación de energía en la ciudad de Puno, resaltando la biodigestión anaeróbica como una solución prometedora y ambientalmente beneficiosas.

**Palabras clave:** Biodigestión, ciudad, electricidad, metano, potencial energético

### Abstract

This research work aimed to evaluate the relationship between methane production by biodigestion of organic solid waste, its energy potential and efficiency to generate electricity in the city of Puno. The specific objectives included the characterisation of organic waste and the evaluation of the energy potential of methane. The main focus was on anaerobic biodigestion, a process that decomposes organic matter in the absence of oxygen, generating methane as a by-product. The focus was on food waste, fruit and vegetable peelings and leftover fruit and vegetables as the main biomass components, collected from the city's markets. A descriptive quantitative research approach was used to collect specific data on methane production, energy potential and efficiency in electricity generation. As for the results, the yield of the biodigestion process is 41.5709 %, which allows producing a volume of 734.6382 cubic metres of methane. The calculated energy potential of the methane produced is 5142.6802 kWh (18513.65 Mega Joules), underlining the feasibility of using organic waste for energy generation. The estimated electrical power is 303.7 KW, which confirms the efficiency of the process, especially considering the specific composition of the biomass. This study provides valuable insights for the development of sustainable waste management and energy generation strategies in the city of Puno, highlighting anaerobic biodigestion as a promising and environmentally beneficial solution.

**Keywords:** Biodigestion, city, electricity, methane, energy potential.

Recibido: 11 abr. 2024

Aceptado: 08 ag. 2024

Publicado: 27 set. 2024

\*Autor para correspondencia: [josevargas@unap.edu.pe](mailto:josevargas@unap.edu.pe)

**Cómo citar:** Vargas Maron, J. A. (2024). Evaluación del potencial energético y la eficiencia para generar energía mediante la producción de metano. *Revista de Investigaciones*, 13(3), 128-138. <https://doi.org/10.26788/ri.v13i3.5837>

## Introducción

Ante el agravamiento de los problemas climáticos, las naciones dirigen sus esfuerzos a construir matrices de energías renovables (Araujo y Oliveira, 2023). El aumento de las emisiones de CO<sub>2</sub> se ha convertido en uno de los principales problemas del mundo, más del 80 % del consumo energético fósil a nivel mundial, lo que corresponde al 90 % de las emisiones de las emisiones de CO<sub>2</sub> derivadas de la actividad humana. (Wang et al. 2022).

Los residuos sólidos orgánicos son de naturaleza heterogénea, con distintas características físicas y químicas. Entre ellas se incluyen el contenido de humedad, densidad, demanda química de oxígeno, sólidos totales, potencial de biometano, nitrógeno total, y fósforo total (Adetunji, Oberholster, & Erasmus 2023).

El sector energético desempeña un papel dominante en el impulso de la economía de cualquier país, debido a estos retos, el uso de fuentes de energía renovables es cada vez más importante; en particular, la energía producida biológicamente como una alternativa atractiva a la creciente escasez de combustibles fósiles (Ajay, Mohan, & Dinesha 2021). Las empresas que adopten formas alternativas de energía podrán aumentar su competitividad y utilizar los residuos para generar energía, lo que supone un enfoque ecológico y eficiencia económica (Oliveira et al., 2011). Las soluciones consideran la producción de biogás como la principal vía de conversión de energía; las soluciones tecnológicas incluyen biodigestores, generadores de energía y sistemas combinados de calor y electricidad (Schneider et al., 2020).

El porcentaje de residuos alimentarios y verdes en los residuos sólidos urbanos (RSU) de los países de ingresos bajos y medios es muy elevado, constituyendo entre el 53 % y el 57 % (Saadoun et al. 2022). Se denomina residuo a los materiales inútiles o subproductos que se desprenden de un proceso biodegradable de plantas o animales, se pueden agrupar en diferentes formas como sólidos, líquidos, orgánicos, reciclables o peligrosos; sin embargo, los residuos sólidos plantean importantes problemas a la humanidad, especialmente en las poblaciones urbanas (Adetunji, Oberholster,

& Erasmus 2023). Los residuos biodegradables pueden tener repercusiones negativas al medio ambiente cuando se gestionan de forma inadecuada, sobre todo en vertederos (Varghese et al. 2023). El porcentaje de residuos alimentarios y verdes en los residuos sólidos urbanos (RSU) de los países de ingreso bajo y medio es muy elevado, constituyendo entre el 53 % y el 57 %. En estos países, el vertido es la opción más utilizada para eliminar los residuos (Saadoun et al. 2022).

Teniendo en cuenta el continuo aumento de los residuos sólidos generados por la población mundial y las eminentes amenazas para la salud pública y ambiental que se derivan de las prácticas inadecuadas utilizadas para el depósito final de los residuos por parte de las naciones en vías de desarrollo (Lino et al., 2023). Una cadena de suministro de residuos a energía no es sólo una forma útil de generar energía, sino que también ofrece una solución combinada para la gestión de residuos y la emisión de gases de efecto invernadero, contribuyendo así a lograr un medio ambiente verde y una economía próspera (Shah et al. 2021). En los últimos años, el menor impacto en el medio ambiente y la mayor eficiencia son los objetivos, y varios estudios se realizaron y analizaron para evaluar el punto de vista termodinámico, medioambiental y económico de los sistemas de generación (Agonafer, Eremed, & Adem 2022).

La fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos y el combustible derivado de residuos son materias primas atractivas para la biorrefinería y la biotecnología para aplicaciones en diversos mercados energéticos (Varghese et al. 2023). Los contaminantes orgánicos y los patógenos microbianos contaminan el suelo y las fuentes de agua de la región cercana. Se ha sugerido que la digestión anaerobia es la forma más prometedora para el reciclaje de energía, puede producir biogás rico en CH<sub>4</sub> a partir del flujo orgánico. Los residuos líquidos y sólidos, denominados digestato se utilizan como fertilizantes (Yang et al. 2022). Antes de seleccionar e implantar las tecnologías, es necesario conocer la cantidad de residuos generados sus características y composición (Kumar & Samadder 2017). En todo el mundo se producen anualmente más de 10.000 millones de toneladas de residuos sólidos, que en

2025 ascenderán a 14,800 millones de toneladas (Hasan et al. 2021).

Ante el agravamiento de los problemas climáticos, las naciones dirigen sus esfuerzos a construir matrices de energías renovables, en lo que respecta específicamente a la biomasa, puede contribuir a la creación y el fortalecimiento de ventajas competitivas verdes en términos de costes para las unidades agrícolas (Araujo y Oliveira, 2023). Las soluciones consideran la producción de biogás como la principal vía de conversión de energía; las soluciones tecnológicas incluyen biodigestores, generadores de energía y sistemas combinados de calor y electricidad que suministran no sólo los servicios energéticos que demandan las explotaciones lecheras (gas de cocina, electricidad, refrigeración y agua caliente), sino también fertilizantes orgánicos (Schneider et al., 2022).

Las fuentes de energía convencionales como el carbón, el petróleo, el gas natural, etc., se utilizan para satisfacer la demanda energética ya que poseen un alto rendimiento energético (Ajay, Mohan, & Dinesha 2021). La biomasa ha atraído cada vez más atención a lo largo de los años debido a su amplia disponibilidad y su coste decreciente (Oliveira et al. 2021). La biomasa es una de las mayores fuentes renovables de energía que se extrae de los materiales orgánicos y los recursos naturales (Almatrafi, Khaliq, & Abuhabaya 2022). La biomasa es cualquier recurso renovable derivado de materia orgánica de origen animal o vegetal, existente en la naturaleza o generado por el hombre y/o animales, como residuos de actividades agrícolas e industriales y también residuos urbanos que pueden utilizarse como fuente alternativa de energía (Ferreira et al. 2018). La gestión de los residuos sólidos en el pasado consistía en depositar en vertederos abiertos, seguidos de la quema para reducir su volumen, generando varios problemas medioambientales, incluida la contaminación del suelo y las aguas subterráneas, humos tóxicos y emisiones de gases de efecto invernadero, y un mayor número de moscas y mosquitos causantes de diversas enfermedades (Hasan et al., 2021). La gestión de los residuos implica una lista de actividades y medidas a adoptarse para minimizar las consecuencias perjudiciales de la acumulación de residuos en la salud de las personas y el medio ambiente que incluyen el almacenamiento,

la recogida, la clasificación, el transporte y el tratamiento de residuos (con o sin recuperación de energía) (Kaur, Bharti, & Sharma 2021).

La biomasa es una de las mayores fuentes renovables de energía que se extrae de los materiales orgánicos y los recursos naturales, dependiendo de la potencialidad de los diferentes países, varios materiales de biomasa son conocidos como fuentes renovables para la producción de combustible (Almatrafi, Khaliq, & Abuhabaya 2022). Estos residuos pueden ser utilizados por los productores rurales o por las agro industrias para la combustión directa, con el fin de producir biogás en biodigestores (Avaci et al. 2013). La digestión anaeróbica podría ser una metodología prometedora para convertir los bioresiduos en combustible sostenible para aplicaciones como generación de energía, calefacción, secado, refrigeración, etc. (Glavin et al. 2021).

Se espera que el biogás sea una de las futuras fuentes de energía renovable que se produce a través de la fermentación del metano en una digestión anaeróbica, implica complejas interacciones microbianas en cuatro etapas biológicas y químicas principales, que son la hidrólisis, la acidogénesis, la acetogénesis y la metanogénesis (Bahrudin et al. 2022). El biogás producido a partir de la digestión anaeróbica de residuos es un recurso renovable relevante que desempeña un papel significativo en la mitigación de los problemas ambientales y en la generación local de energía eléctrica. en la mitigación de problemas ambientales y en la generación local de energía eléctrica (Freitas et al. 2019).

El biogás se produce por la degradación de materiales orgánicos por microorganismos en condiciones anaeróbicas (en ausencia de oxígeno) (Roozitalab, Hamidavi, & Kargari 2023). El biogás contiene gases liberados por el consumo anaeróbico de materia orgánica por parte de bacterias metanogénicas, lo que se denomina fermentación del metano (Emmanuel, Nganyira, & Shao 2022). El biogás liberado a la atmósfera, así como la intensa contaminación son algunos de los impactos negativos de este método; sin embargo, el biogás tiene un importante potencial energético y beneficios medioambientales

que no pueden descartarse (Lino, Ismail, & Castañeda-Ayarza 2023).

Los métodos de conversión termoquímica emplean el principio básico de la descomposición de los residuos orgánicos por la acción del calor, esto incluye la conversión de biomasa en biocombustibles. (Shah et al. 2021). El uso de tecnologías de transformación termoquímica como la pirólisis y la combustión es una de las opciones disponibles para generar biogás a partir de sustratos de biomasa que tiene valores caloríficos netos y brutos de 18,64 y 20,14 MJ/kg de masa seca, y es un sustrato de partida prometedor para la generación de calor mediante combustión (Emmanuel, Nganyira, & Shao 2022). La generación de electricidad mediante motores Stirling puede llevarse a cabo transformando en calor diferentes fuentes de energía; así pues, el uso de biocombustibles despierta el interés por ser una solución viable y renovable en zonas de donde la producción ganadera presenta un gran potencial

como biocombustible (Caetano et al. 2022). La electrificación portátil con baterías proporciona una fuente de energía asequible y evita los costes y las normativas asociadas a las líneas de transmisión físicas, un sistema de digestión anaerobia consume residuos orgánicos y produce biogás que alimenta un generador eléctrico para cargar baterías (Cherry et al. 2014).

## Métodos

**Ámbito o Lugar de Estudio:** La zona del estudio está ubicada en la región de Puno, Provincia de Puno, distrito de Puno, específicamente en la Universidad Nacional del Altiplano; geográficamente está ubicada entre los 15° 48' y 15° 55' de latitud sur y los 69° 57' y 70° 03' de longitud oeste, comprende altitudes entre los 3 811 y 4 050 m.s.n.m., en la parte Sur del Perú, aproximadamente a 1 350 km. al Sur Este de Lima, en el flanco oriental de la Cordillera de los Andes y a una altitud de 3 812 m.s.n.m.

**Figura 1**

Zona donde se realizó la investigación (Puno)



Fuente: Google earth

El periodo de estudio correspondiente fue en el mes de abril del año 2023 y la frecuencia de muestreo se realizaron de forma continua en el laboratorio de ingeniería química de la Universidad Nacional del Altiplano Puno.

La muestra analizada corresponde a 1200 gramos de residuos sólidos orgánicos que es procesado en el biorreactor Crown CH<sub>4</sub> obteniendo el metano

que es registrado mediante el sensor de metano Flying-Fist MQ-4.

## Evaluación de la cantidad y características de los Residuos Sólidos Orgánicos para determinar la producción de metano por biodigestión en la Ciudad de Puno

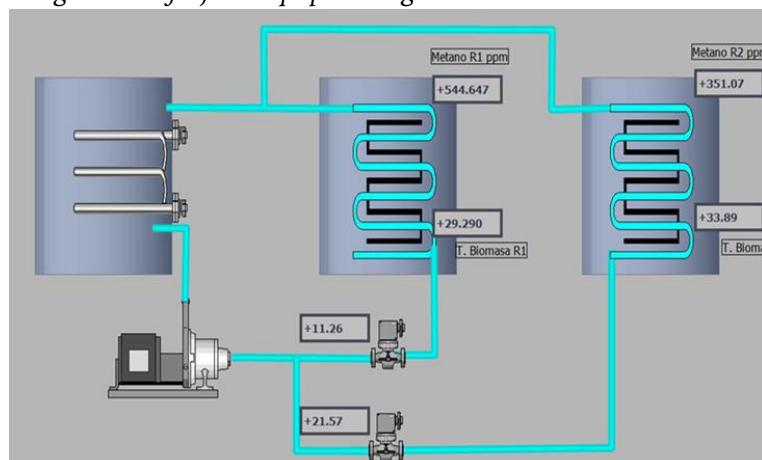
Para la realizar la medición de la producción de metano se utilizó el biorreactor marca CROWN

y modelo del sensor de metano Flying-Fist MQ-4. El primer paso es la recogida de los residuos sólidos municipales. Existen diferentes métodos de recogida de residuos. Los residuos se recogen puerta a puerta en carros y carretillas, de cubos de basura, mediante el transporte de los residuos por los residentes a los vehículos de recogida de residuos. La recogida diaria de residuos es muy importante, ya que se trata principalmente de materia orgánica que empieza a descomponerse. La clasificación de los residuos por un individuo antes de enviarlos a los centros de recogida es un factor clave de la gestión de residuos. Así que cada residente debe clasificar los residuos orgánicos, inorgánicos, húmedos y secos. La gestión de residuos es un proceso cooperativo y la responsabilidad de todos para mantener su planeta verde y limpio. Los residuos recogidos se transportan a plantas

donde se procesan en función de su calidad. de los residuos (Kaur et al., 2021).

En el caso de los residuos sólidos urbanos, en primer lugar, hay que separar la materia orgánica de los residuos antes de ser tratados en un digestor anaeróbico. La mezcla se calienta tanque cerrado y el gas se captura mediante una cubierta flotante o se recoge en un tanque separado. Es esencial aplicar técnicas adecuadas de refinamiento al biogás producido durante la digestión anaerobia. Estos tratamientos se centran en la eliminación del dióxido de carbono y otros gases no deseados, garantizando que el biogás sea adecuado para aplicaciones energéticas. para. El proceso genera un residuo en forma de lodo oscuro y oloroso que debe eliminarse (Traven 2023).

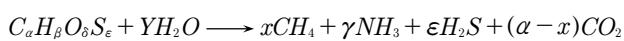
**Figura 2**  
*Diagrama de flujo de equipo biodigestor*



Fuente: Biorreactor Crown CH4

### Evaluación el potencial energético del metano producido y su viabilidad para la eficiente generación de energía eléctrica sostenible a nivel local

La producción estequiométrica de metano en la digestión anaeróbica puede calcularse mediante la ecuación de Buswell, como se muestra en la Ecuación (Bahrung et al. 2022).



La tasa de producción de metano puede estimarse utilizando estas ecuaciones estequiométricas

a partir de la descomposición de algún tipo de sustratos, en particular los materiales orgánicos de composición química (Bahrung et al. 2022).



### Cálculo del potencial energético del biogás

La metodología adoptada en este estudio para calcular el potencial energético utilizó un grado de eficiencia para la captación de gas, que viene determinado por el sistema biodigestor y también está relacionado con el poder calorífico inferior del biogás en las condiciones estándar de presión

y temperatura. La potencia resultante es una función del valor calorífico del biogás quemado (Pinto et al. 2023):

$$P = Q_{CH_4} * E_c * LHV * \eta * \left( \frac{1}{31536000} * \frac{1}{1000} \right)$$

Donde:

P = Potencia (kW)

$Q_{CH_4}$  = Caudal de  $CH_4$  ( $m^3 \cdot \text{año}^{-1}$ )

$E_c$  = Eficiencia de la captación de gas (%)

LHV = Valor calorífico inferior del biogás (kJ/m<sup>3</sup>)

$\eta$  = Eficiencia del motor de combustión interna funcionando a plena carga.

31 536 000 = tiempo de funcionamiento durante un año.

La energía producida a lo largo de un año es directamente proporcional a la potencia y el factor de capacidad de generación (FC) (Pinto et al. 2023).

La energía producida puede ser calculada a través de la ecuación siguiente:

$$E = P * CF * 8760$$

Donde:

E = Energía generada en un año (kWh)

P = Potencia (kW)

CF = Factor de capacidad de generación (adoptado 80 %)

8760 = Tiempo de funcionamiento en un año (h).

La variable independiente considerada es la composición de residuos orgánicos para la biodigestión, mientras que la variable dependiente es la producción de metano resultante de este proceso.

### Generación de energía

Se aplicó el programa estadístico InfoStat/L, para determinar la correlación entre las variables analizadas, para los residuos sólidos orgánicos y la correlación con la producción de metano el p valor es 0,0006. para la correlación entre la producción de metano y la generación de energía eléctrica el p valor es 0,0001.

### Resultados y Discusión

#### Evaluación de la cantidad y características de los Residuos Sólidos Orgánicos para determinar la producción de metano por biodigestión en la Ciudad de Puno

Se muestra la cantidad de los residuos aprovechables clasificados en residuos orgánicos, inorgánicos y otros aprovechables caracterizados por la Municipalidad Provincial de Puno (Tabla 1).

**Tabla 1**  
*Características de los residuos*

Tipo de residuo	Residuos aprovechables	Composición Porcentual (%)
Residuos Orgánicos	Residuos de alimentos (restos de comida, cáscaras, restos de frutas, verduras, hortalizas y otros similares) Residuos de maleza y poda (restos de flores, hojas, tallos, Grass, otros similares) Otros orgánicos (estiércol de animales menores, huesos y similares)	15,3 1,3 0,9
Residuos inorgánicos	Papel Cartón Vidrio Plástico Tecnopor Tetra pack Metales	3,0 3,4 2,9 3,7 0,9 0,5 2,7
Otros reaprovechables		3,5

Observamos estadísticamente que se tiene residuos de alimentos (restos de comida, cáscaras, restos de frutas, verduras, hortalizas y otros similares) un porcentaje de 15,3 %; residuos de maleza y poda (restos de flores, hojas, tallos, grass, otros similares) tiene un porcentaje de 1,3 % y otros orgánicos (estiércol de animales menores, huesos y similares) con 0,9 %. y la cantidad de los residuos

inorgánicos clasificados en papel (3 %), cartón (3,4 %), vidrio (2,9 %), plástico (3,7 %), Tecnopor (0,9 %), Tetra pack (0,5 %), metales (2,7 %), y otros (3,5 %).

Se muestra la cantidad de toneladas de generación de residuos sólidos por día en diferentes sectores de la ciudad caracterizados por la Municipalidad Provincial de Puno (Tabla 2)

**Tabla 2**  
*Generación de residuos sólidos*

<b>Generación de residuos sólidos Generación total (Tn/día)</b>	
Domiciliario	70,05
Mercado	8,61
Instituciones Educativas	6,33
Establecimientos comerciales	15,51
Barriado de calles	6,95
<b>Total</b>	<b>107,45</b>

Estadísticamente vemos que la generación de residuos domiciliarios tiene un total de 70,05 toneladas por día, seguida por los establecimientos comerciales, mercados e instituciones educativas.

Se muestra la cantidad de residuos sólidos urbanos compostificables generados y clasificados en residuos de alimentos, restos de vegetales, restos de poda, y otros (Tabla 3).

**Tabla 3**  
*Tipos de residuos sólidos*

<b>Tipo de residuos sólidos</b>	<b>Composición porcentual (%)</b>
<b>Residuos Reaprovechables</b>	<b>94,79</b>
<b>Residuos Compostificables</b>	<b>83</b>
Residuos de alimentos	6,94
Restos de vegetales	71,17
Restos de poda	3,91
Excretas de animales	0,00
Otros (cáscaras de huevo, etc.)	0,76
<b>Residuos Reciclables</b>	<b>12,00</b>
<b>Residuos no aprovechables</b>	<b>5,23</b>

Estadísticamente tenemos que los residuos de alimentos componen 6.94%, restos de vegetales 71.17%, restos de poda 3,91 %, y otros 0,76 %.

$$PT = 6\,725,271 \text{ Kg}$$

Para calcular la biomasa total se considera la composición porcentual que es; residuos de alimentos (6,94 %), restos de vegetales (71,17 %), (6,94+71,17 = 78,11 %)

Con que el calculamos el volumen de metano que se puede producir:

$$Vol.\ Total CH_4 = (Peso\ específico) * PT = \left( \frac{Vol.\ CH_4}{Peso\ CH_4} \right) * PT$$

$$Vol.\ Total CH_4 = \left( \frac{0,040734 m^3}{0,3729} \right) * 6725,271 kg$$

$$Vol.\ Total CH_4 = 0,10924 \frac{m^3}{kg} * 6725,271 kg$$

$$Vol.\ Total CH_4 = 734,6686 m^3$$

Entonces la biomasa total es:

$$PT = 0,7811 GT = 0,7811 \times 8610 = 6\,725,271 \text{ Kg}$$

Como resultado se tiene que la cantidad de metano generado es 734,6382 metros cúbicos, el potencial energético que se puede producir se calculó en 5142,6802 Kwh. (18513.65 Mega julios), este alto potencial energético destaca la importancia de utilizar residuos de alimentos para la producción de energía a través de la biodigestión.

Richards & Yabar (2023) determina que el sistema de biogasificación en condiciones de alimentación por lotes de la granja Yuge de Kobe (Japón) es un excelente ejemplo de gestión adecuada de residuos agrícolas para el aprovechamiento de los recursos. En la actualidad, los dos digestores de la granja suministran 2,400 m<sup>3</sup> de biogás procedente de estiércol de vaca lechera, subproductos lácteos y otros residuos. Sin embargo, las enmiendas a los sustratos pueden aumentar la producción de biogás a 13 166,01 m<sup>3</sup> anuales con un potencial de energía eléctrica de 2 843,20 kWh/año, frente a la producción actual de 518,28 kWh/año, desplazando así a la electricidad generada a partir de combustibles fósiles.

### Evaluación del potencial energético del metano producido y su viabilidad para la eficiente generación de energía eléctrica sostenible a nivel local

Con los datos obtenidos se evalúa el potencial energético del metano producido para la obtención de la potencia eléctrica.

La potencia resultante es:

$$P = Q_{CH_4} * E_c * LHV * \eta * \left( \frac{1}{31536000} * \frac{1}{1000} \right)$$

Donde:

P = Potencia (kW)

$Q_{CH_4}$  = Caudal de CH<sub>4</sub> (m<sup>3</sup>·año-1) = 268142, 943  
Ec = Eficiencia de la captación de gas (%) = 41, 5709 %

LHV = Valor calorífico inferior del biogás (kJ/m<sup>3</sup>), (tomado como 35 800 kJ.m<sup>-3</sup>)

$\eta$  = Eficiencia del motor de combustión interna funcionando a plena carga (tomado como 30 %).  
31 536 000 = tiempo de funcionamiento durante un año (s).

Reemplazando datos:

$$P = 268142,943 * 41,5709\% * 35800 * 30 * \left( \frac{1}{31536000} * \frac{1}{1000} \right)$$

$$P=379,62384 \text{ KW}$$

La energía producida a lo largo de un año es directamente proporcional a la Potencia y el factor de capacidad de generación (FC).

$$E=P*CF*8760$$

Donde:

E = Energía generada en un año (kWh)

P = Potencia (kW)

CF = Factor de capacidad de generación (adoptado 80%)

8760 = Tiempo de funcionamiento en un año (h).

$$E=379,62384*0,8*8760$$

$$E=3200000 \text{ kWh}$$

Considerando 1KWh = 3600 kilo Julios = 3600 kJ

$$\Rightarrow E=3200000 * 3600$$

$$\Rightarrow E=11520000000 \text{ kJ}$$

Para seleccionar un MCI se calcula la potencia si se utiliza en un día.

$$Pe=3200000 / 8760 \text{ h}$$

$$Pe=363,7 \text{ KW}$$

La potencia eléctrica calculada que se de 363,7 KW sugiere que la conversión de metano en electricidad es un enfoque prometedor y factible desde el punto de vista energético.

Vilas Bôas et al. (2023) en su investigación de generación de energía eléctrica a partir de biogás mediante un proceso de codigestión de bovino y porcino en biodigestores anaeróbicos. Los resultados mostraron que los proyectos de plantas de biogás a partir de 1,410 cabezas de ganado vacuno y 2.350 cabezas de ganado porcino. Esta proporción de residuos da lugar a un flujo de metano de 163,41 m<sup>3</sup>/día, lo que corresponde a un potencial energético de 128 MWh/año, lo que

sitúa a la empresa dentro de la categorización de micro generación distribuida.

## Conclusiones

De la muestra analizada corresponde a 1200 gramos de residuos sólidos orgánicos que es procesado en el biorreactor Crown CH4 registrando mediante el sensor de metano Flying-Fist MQ-4, para el periodo de evaluación en el año 2023, el metano producido por biodigestión de residuos sólidos orgánicos, caracterizados principalmente por residuos de alimentos, cascaras y restos de verduras, tuvo un rendimiento del proceso de biodigestión de 41,5709%, con un volumen de 734,6382 metros cúbicos.

Con el metano generado que es 734,6382 metros cúbicos, el potencial energético que se puede producir se calculó en 5142,6802 Kwh. (18513,65 Mega julios), este alto potencial energético destaca la importancia de utilizar residuos de alimentos para la producción de energía a través de la biodigestión.

La viabilidad para la eficiente generación de energía eléctrica se evidenció con una potencia eléctrica calculada de 303,7 KW. Estos resultados sugieren que la conversión de metano en electricidad es un enfoque prometedor y factible desde el punto de vista energético.

## Referencias

Adetunji, Adegoke Isiaka, Paul Johan Oberholster, & Mariana Erasmus. 2023. "From Garbage to Treasure: A Review on Biorefinery of Organic Solid Wastes into Valuable Biobased Products." *Bioresource Technology Reports* 24 (August): 101610. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2023.101610>.

Agonafer, Tamerat Demeke, Wondwossen Bogale Eremed, & Kamil Dino Adem. 2022. "Biogas-Based Trigeneration System: A Review." *Results in Engineering* 15 (July): 100509. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100509>.

Ajay, C. M., Sooraj Mohan, & P. Dinesha. 2021. "Decentralized Energy from Portable Biogas Digesters Using Domestic Kitchen

Waste: A Review." *Waste Management* 125: 10–26. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.02.031>.

Almatrafi, Eydhah, Abdul Khalil, & Abdullah Abuhabaya. 2022. "Thermodynamic and Exergetic Assessment of a Biomass Derived Syngas Fueled Gas Turbine Powered Trigeneration System." *Case Studies in Thermal Engineering* 35 (March): 102099. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.102099>.

Avaci, Angelica Buzinaro, Samuel Nelson Melegari De Souza, Ivan Werncke, & Luiz Inácio Chaves. 2013. "Financial Economic Scenario for the Microgeneration of Electric Energy from Swine Culture-Originated Biogas." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 25: 272–76. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.04.005>.

Bahrun, Mohd Hardyanto Vai, Awang Bono, Norasikin Othman, & Muhammad Abbas Ahmad Zaini. 2022. "Carbon Dioxide Removal from Biogas through Pressure Swing Adsorption – A Review." *Chemical Engineering Research and Design* 183: 285–306. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2022.05.012>.

Caetano, Bryan Castro, Nathália Duarte Souza Alvarenga Santos, Vitor Mourão Hanriot, Oscar R. Sandoval, & Rudolf Huebner. 2022. "Energy Conversion of Biogas from Livestock Manure to Electricity Energy Using a Stirling Engine." *Energy Conversion and Management: X* 15 (April). <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2022.100224>.

Cherry, Calvin A., Michael Rios, Aleia McCord, Sarah Stefanos, & Giri Venkataramanan. 2014. "Portable Electrification Using Biogas Systems." *Procedia Engineering* 78: 317–26. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.07.073>.

Emmanuel, Jovine K., Philimon D. Nganyira, & Godlisten N. Shao. 2022. "Evaluating the Potential Applications of Brewers' Spent Grain in Biogas Generation, Food and Biotechnology Industry: A Review." *Heliyon* 8 (10): e11140. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e11140>.

- Ferraresi de Araujo, Geraldo Jose, & Sonia Valle Walter Borges de Oliveira. 2023. "Economic, Energetic and Environmental Analysis of the Utilization of Swine Manure in Brazil: Opportunities and Challenges." *Energy Strategy Reviews* 47 (February): 101089. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2023.101089>.
- Ferreira, L. R.A., R. B. Otto, F. P. Silva, S. N.M. De Souza, S. S. De Souza, & O. H. Ando Junior. 2018. "Review of the Energy Potential of the Residual Biomass for the Distributed Generation in Brazil." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 94 (June): 440–55. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.06.034>.
- Freitas, F. F., S. S. De Souza, L. R.A. Ferreira, R. B. Otto, F. J. Alessio, S. N.M. De Souza, O. J. Venturini, & O. H. Ando Junior. 2019. "The Brazilian Market of Distributed Biogas Generation: Overview, Technological Development and Case Study." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 101 (June 2018): 146–57. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.11.007>.
- Glivin, Godwin, N. Kalaiselvan, V. Mariappan, M. Premalatha, P. C. Murugan, & Joseph Sekhar. 2021. "Conversion of Biowaste to Biogas: A Review of Current Status on Techno-Economic Challenges, Policies, Technologies and Mitigation to Environmental Impacts." *Fuel* 302 (May): 121153. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121153>.
- Hasan, M. M., M. G. Rasul, M. M.K. Khan, N. Ashwath, & M. I. Jahirul. 2021. "Energy Recovery from Municipal Solid Waste Using Pyrolysis Technology: A Review on Current Status and Developments." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 145 (March): 111073. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111073>.
- Kaur, Aashishdeep, Ruchi Bharti, & Renu Sharma. 2021. "Municipal Solid Waste as a Source of Energy." *Materials Today: Proceedings* 81 (2): 904–15. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.04.286>.
- Kumar, Atul, & S. R. Samadder. 2017. "A Review on Technological Options of Waste to Energy for Effective Management of Municipal Solid Waste." *Waste Management* 69: 407–22. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.08.046>.
- Lino, Fátima A.M., Kamal A.R. Ismail, & Juan A. Castañeda-Ayarza. 2023. "Municipal Solid Waste Treatment in Brazil: A Comprehensive Review." *Energy Nexus* 11 (August). <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2023.100232>.
- Oliveira, Augusto Cesar Laviola de, Natalia dos Santos Renato, Marcio Arêdes Martins, Isabela Miranda de Mendonça, Camile Arêdes Moraes, & Michael de Oliveira Resende. 2021. "Modeling for Estimating and Optimizing the Energy Potential of Animal Manure and Sewage in Small and Medium-Sized Farms." *Journal of Cleaner Production* 319 (August). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128562>.
- Pinto, Jucimar Augusto, Regina Mambeli Barros, Ivan Felipe Silva dos Santos, Geraldo Lúcio Tiago Filho, Maria Cláudia de Oliveira Botan, Thayla Francisca Vilas Bôas, & Adriele Maria de Cássia Crispim. 2023. "Study of the Anaerobic Co-Digestion of Bovine and Swine Manure: Technical and Economic Feasibility Analysis." *Cleaner Waste Systems* 5 (May): 100097. <https://doi.org/10.1016/j.clwas.2023.100097>.
- Richards, D., & H. Yabar. 2023. "Promoting Energy and Resource Recovery from Livestock Waste: Case Study Yuge Farm, Japan." *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering* 7 (November 2022): 100299. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2023.100299>.
- Roozitalab, Atefeh, Fatemeh Hamidavi, & Ali Kargari. 2023. "A Review of Membrane Material for Biogas and Natural Gas Upgrading." *Gas Science and Engineering* 114 (April): 204969. <https://doi.org/10.1016/j.jgsce.2023.204969>.
- Saadoun, Lamia, Alessio Campitelli, Jan Kannengiesser, Daniel Stanojkovski, Abdelhafid El Alaoui El Fels, Laila Mandi, & Naaila Ouazzani. 2022. "Acidogenic

- Digestion of Organic Municipal Solid Waste in a Pilot Scale Reactor: Effect of Waste Ratio and Leachate Recirculation and Dilution on Hydrolysis and Medium Chain Fatty Acid Production." *Bioresource Technology Reports* 17 (November 2021): 100872. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2021.100872>.
- Shah, Anil V., Vijay Kumar Srivastava, Swayansu Sabyasachi Mohanty, & Sunita Varjani. 2021. "Municipal Solid Waste as a Sustainable Resource for Energy Production: State-of-the-Art Review." *Journal of Environmental Chemical Engineering* 9 (4): 105717. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105717>.
- Traven, Luka. 2023. "Sustainable Energy Generation from Municipal Solid Waste: A Brief Overview of Existing Technologies." *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering* 8 (September): 100491. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2023.100491>.
- Varghese, Saju, Mekonnen M. Demeke, Roland Verhé, Emile Redant, Cedric Vander Cruyssen, & Johan M. Thevelein. 2023. "Process Optimization for Saccharification and Fermentation of the Organic Fraction of Municipal Solid Waste (OFMSW) to Maximize Ethanol Production Performance." *Bioresource Technology Reports* 24 (June). <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2023.101681>.
- Vilas Bôas, Thayla Francisca, Regina Mambeli Barros, Jucimar Augusto Pinto, Ivan Felipe Silva dos Santos, Electo Eduardo Silva Lora, Rubenildo Vieira Andrade, Geraldo Lúcio Tiago Filho, Karina Arruda Almeida, & Gabriel de Oliveira Machado. 2023. "Energy Potential from the Generation of Biogas from Anaerobic Digestion of Olive Oil Extraction Wastes in Brazil." *Cleaner Waste Systems* 4 (February): 100083. <https://doi.org/10.1016/j.clwas.2023.100083>.
- Villarroel-Schneider, J., Lena Höglund-Isaksson, Brijesh Mainali, J. Martí-Herrero, Evelyn Cardozo, Anders Malmquist, & Andrew Martin. 2022. "Energy Self-Sufficiency and Greenhouse Gas Emission Reductions in Latin American Dairy Farms through Massive Implementation of Biogas-Based Solutions." *Energy Conversion and Management* 261 (April). <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115670>.
- Villarroel-Schneider, J., Brijesh Mainali, J. Martí-Herrero, Anders Malmquist, Andrew Martin, & Lucio Alejo. 2020. "Biogas Based Polygeneration Plant Options Utilizing Dairy Farms Waste: A Bolivian Case." *Sustainable Energy Technologies and Assessments* 37 (November 2019): 100571. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2019.100571>.
- Walter Borges de Oliveira, Sonia Valle, Alexandre Bevilacqua Leoneti, Glauco Mateus Magrini Caldo, & Marcio Mattos Borges de Oliveira. 2011. "Generation of Bioenergy and Biofertilizer on a Sustainable Rural Property." *Biomass and Bioenergy* 35 (7): 2608–18. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.02.048>.
- Wang, Shule, Yuming Wen, Ziyi Shi, Ilman Nuran Zaini, Pär Göran Jönsson, & Weihong Yang. 2022. "Novel Carbon-Negative Methane Production via Integrating Anaerobic Digestion and Pyrolysis of Organic Fraction of Municipal Solid Waste." *Energy Conversion and Management* 252 (November 2021). <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.115042>.
- Yang, Ying, Sen Wang, Shoufu Wang, Qijiang Wang, Wei Xie, Lin Ye, Jinlin Tu, Xiaozhao Zhang, Guoqing Li, & Nianwen Xiang. 2022. "Lightning Trip-out Risk Assessment and Differential Lightning Protection of 35 KV Transmission Lines in Mountain Wind Farm." *Energy Reports* 8: 581–88. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.11.171>.

